

論文 引張り軸力を受ける鉄筋コンクリート柱のせん断強度に関する研究

吉田格英*1・北山和宏*2・西川孝夫*3

要旨：引張り軸力下におけるRC柱のせん断性状については現在まで検討例が少なく不明の点が多い。本研究では、引張り軸力を一定に保ち逆対称曲げせん断繰返し載荷をするRC柱の実験およびFEMによる単調載荷解析を行い引張り軸力を受けるRC柱のせん断挙動について検討した。その結果、柱の引張り軸力の増大にともない柱部材のせん断耐力が低下し変形性能が向上することを示した。また、日本建築学会の終局強度指針式は引張り軸力時のせん断強度を過大に評価することを指摘した。

キーワード：鉄筋コンクリート、柱、せん断、引張り軸力、付着、非線形FEM解析

1. はじめに

地震時に骨組が地震入力によるエネルギーを消費するためには、梁降伏型の全体降伏機構を形成するべく計画することが望ましい。このとき外柱及び隅柱には水平力による転倒モーメントによって、引張りあるいは圧縮軸力が変動して作用する。変動軸力及び圧縮一定軸力下における鉄筋コンクリート柱部材の曲げせん断性状については、数多くの研究者により実験及び解析を用いた検討が行われているが、引張り軸力下における部材の挙動はあまり研究されておらず、殊に引張り軸力下における柱のせん断性状についてはほとんど検討されていない[1]。そこで、本研究では引張り軸力を受ける柱のせん断挙動を静的実験及びFEM解析により検討した。

2. 実験概要

2-1. 試験体

試験体は実物の約1/3のスケールを持つ同一寸法の柱部材4体(試験体A1～A4)で、全試験体とも曲げ降伏前にせん断破壊するように設計した。シアスパン比は1.0である。実験変数は柱軸力及び横補強筋量である。試験体の寸法及び配筋を図-1に、試験体諸元を表-1に示す。

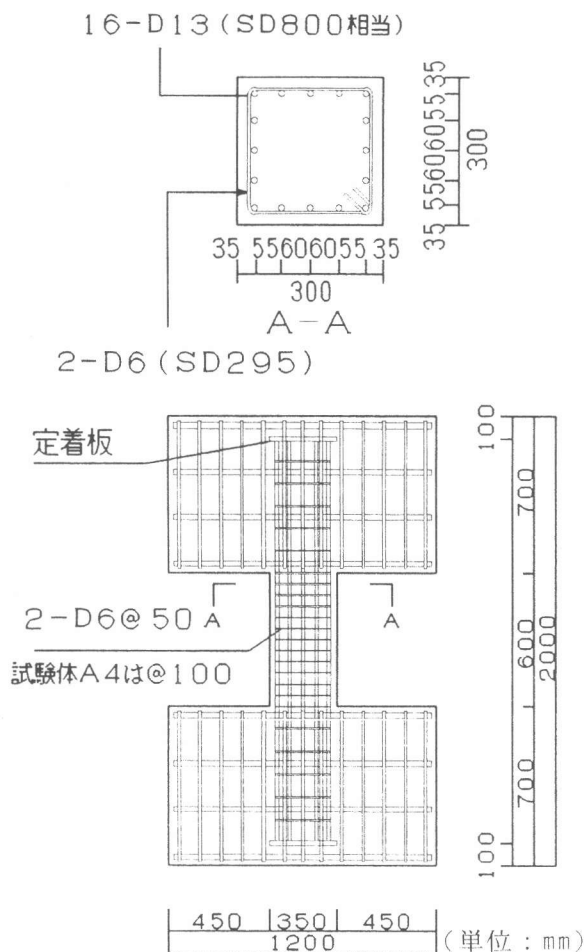


図-1. 試験体配筋図

*1 西松建設、工修（正会員）

*2 東京都立大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*3 東京都立大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

2-2. 加力方法

加力は図-2に示す逆対称曲げせん断加力装置を用いてはじめに一定軸力を導入したのちに正負繰り返しの水平力を加えた。水平方向加力は変位制御で行い、部材変形角 $1/400\text{rad}$ を1サイクル、 $1/200$ 、 $1/100$ 、 $1/50$ 、 $1/25$ をそれぞれ2サイクル行った後 $1/10$ まで加力した。

3. 実験結果

3-1. 破壊経過

各試験体の層間変形角 $1/50\text{rad}$ 終了時のひび割れ状況を図-3に示す。全試験体とも同様の破壊経過であった。いずれも曲げひび割れ、せん断ひび割れ、横補強筋の降伏を経験後最大耐力に到達した。その後せん断変形角が急増し最終的には部材中央部のコンクリートが剥落しせん断破壊した。破壊経過およびひび割れ状況に試験体による違いはあまりみられなかったが、引張り軸力の大きい試験体ほどせん断ひび割れが急激に進展する傾向が見られた。試験体中央部におけるせん断ひび割れと部材軸とのなす角度を数ヶ所において実測したところ、試験体による

差はほとんどみられず平均すると約 32° であった。なお終局強度指針式[2]によるトラス機構の角度は 26.6° 、アーチ機構の角度は 13.3° であった。

3-2. せん断力-層間変位関係

各試験体のせん断力-層間変位関係を図-4に示す。軸力を変数とした試験体A1からA3を比較すると、引張り軸力の増大にともない最大耐力が低下する傾向が見られ、その割合は軸力0の試験体A1に対し、引張り軸力 22.5tonf の試験体A2で 94% 、引張り軸力 45tonf の試験体A3で 89% であった。せん断補強筋の少ない試験体A4は、試験体A3に比べ最大耐力が大幅に低下した。また、引張り軸力の増大にともない剛性が低下する傾向が見られた。最大耐力に対する最終サイクルでの耐力の比は、引張り軸力の増大にともない曲げ変形成分が増加するため大きくなるが、横補強筋量が少ない場合は小さくなった。

表-1. 試験体諸元

I D	M/QD	N	$\eta 0$	σB	ft	主筋	横補 強筋 比		
							配筋	P w	$\sigma w y$
A 1	1. 0	0	0	247	25. 8	16-	2-D6@50	0. 43	4030
A 2		22. 5	0. 1	247	25. 8	D13			
A 3		45. 0	0. 2	222	21. 8	σy			
A 4		45. 0	0. 2	231	24. 9	=8850	2-D6@100	0. 21	

M/QD:シラスパン比、N:引張り軸力(tonf)

$\eta 0$:軸力比($=\sigma 0/\sigma B$)、 $\sigma 0$:軸方向応力度(kgf/cm^2)

σB :コンクリート強度(kgf/cm^2)、ft:割裂引張り強度(kgf/cm^2)

σy :主筋降伏強度(kgf/cm^2)

Pw:横補強筋比(%), $\sigma w y$:横補強筋降伏強度(kgf/cm^2)

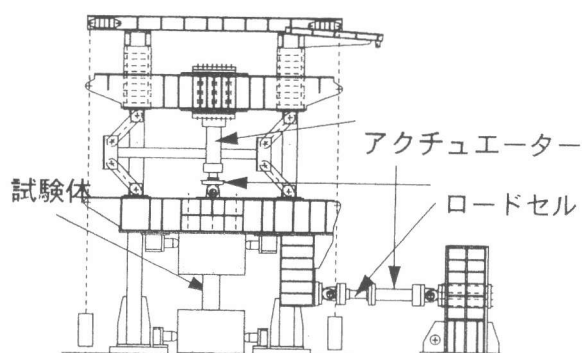


図-2. 加力装置

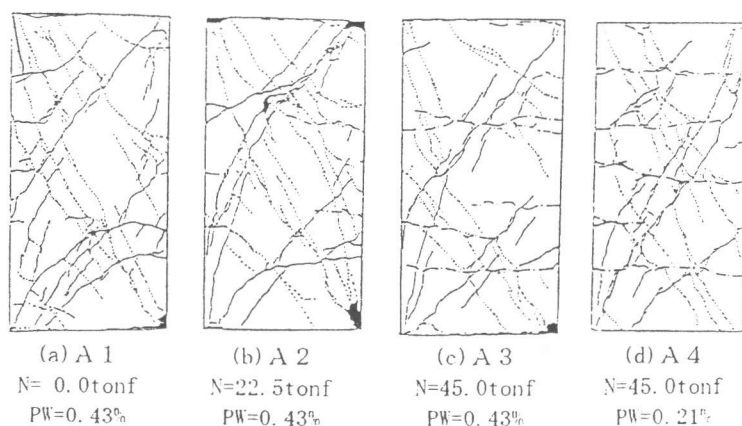


図-3. 層間変形角 $1/50\text{rad}$ 終了時ひび割れ状況

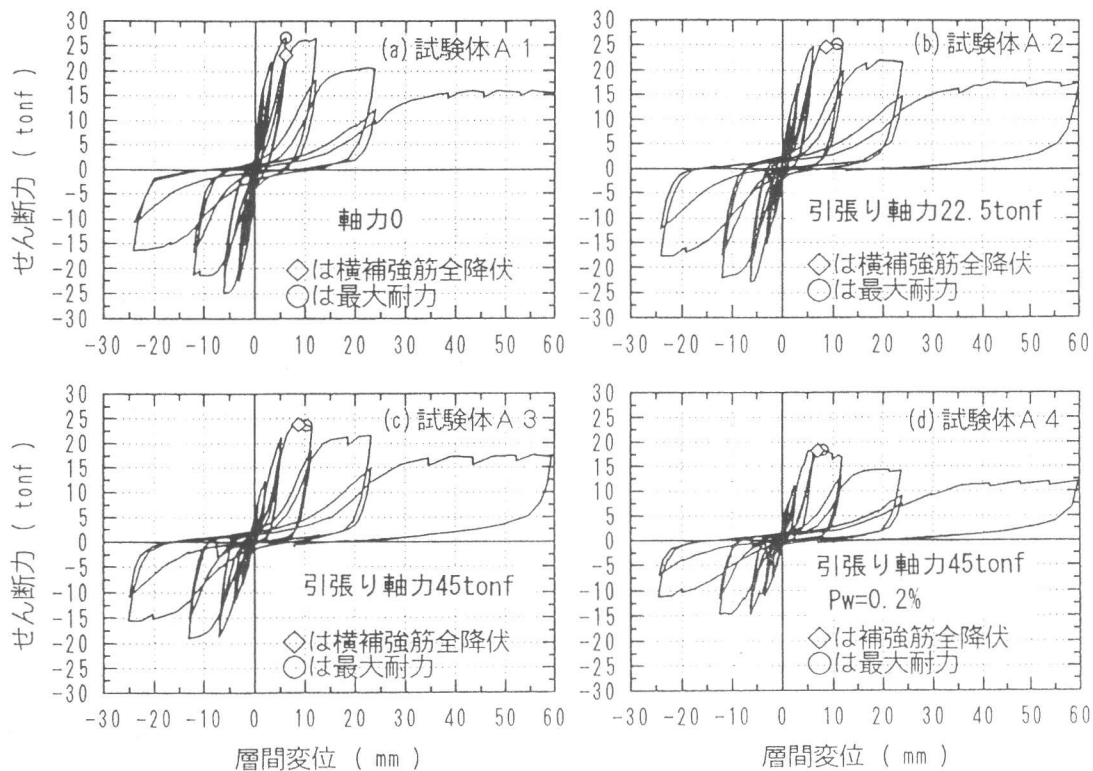


図-4. せん断力-層間変位関係

3-3. せん断力-せん断変形角関係

図-5にせん断力-せん断変形角関係を示す。全試験体を比較すると引張り軸力の増加にともないせん断ひび割れの発生時期が早くなり、せん断ひび割れ発生後の剛性低下が激しくなることがわかった。また、同層間変位時で比較すると引張り軸力の増加にともないせん断変形角が小さくなるが、これは引張り軸力の大きい試験体ほど全体変形に占める曲げ変形成分の割合が大きくなるためである。図-6に層間変位に占めるせん断変形及び曲げ変形の割合を示す。

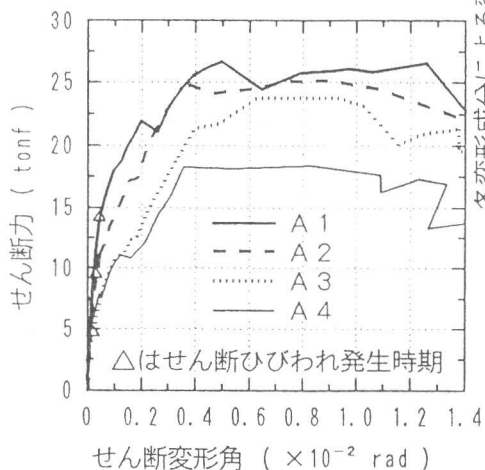


図-5. せん断力-せん断変形角関係

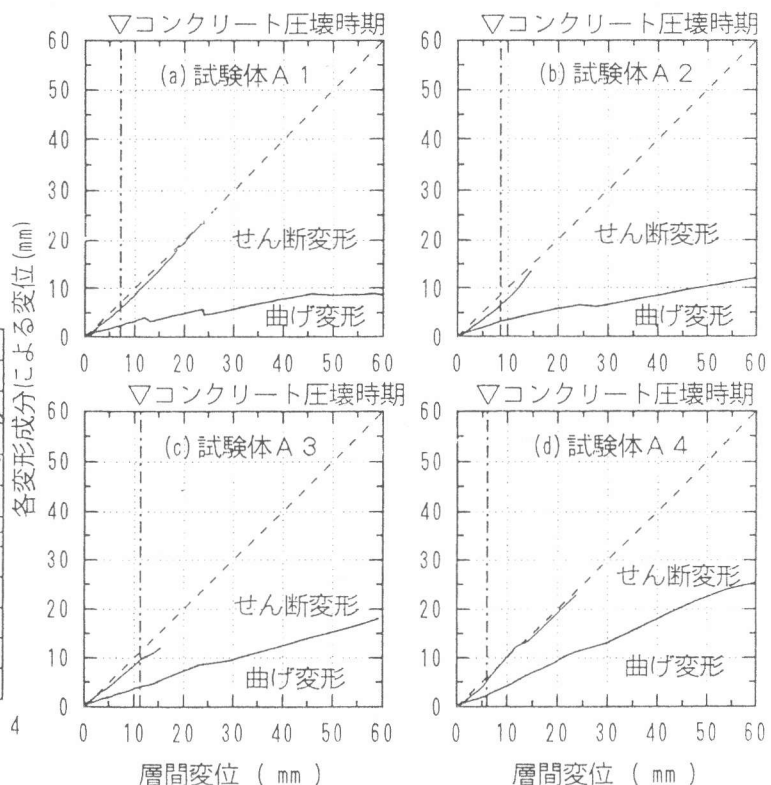


図-6. 層間変位に占めるせん断変形及び曲げ変形の割合

3-4. 柱主筋付着性状

図-7に一段筋隅角部主筋の平均付着応力度-層間変位関係を示す。主筋の区間長さは60cmである。全試験体とも柱主筋の付着劣化は最大耐力以前に発生しているという点で一致した。柱主筋の最大平均付着応力度は引張り軸力が増大してもほとんど変わらなかった(平均で約30kgf/cm²)。

3-5. コンクリートのひずみ状態

図-8に圧縮主ひずみ-引張り主ひずみ関係を示す。主ひずみは、試験体中央より上部27cmおよび下部27cmの領域でそれぞれ3方向のひずみを測定し、上下部の主ひずみを平均して求めた。引張り軸力の増大に伴い最大強度時の引張り主ひずみは大きくなった。

4. 実験結果の検討

4-1. 既往のせん断強度式との比較

せん断強度の計算値と実験値を表-2に示す。柱のせん断強度の計算には文献[2]のせん断終局強度式(指針式)および文献

[3]の修正荒川式を用いた。修正荒川式では引張り軸力は適用範囲外であるが、ここでは引張り軸応力度の符号を便宜的に負としてせん断強度を計算した。修正荒川式では、試験体A3で実験値との差が約15%と若干小さな評価となっているが、他の試験体ではいずれも差が10%以内と小さく比較的对応が良好であった。一方終局強度指針式では、軸力なしの試験体A1では実験値との差が約10%程度であったが、引張り軸力を入れた試験体はいずれもその差が15%程度となり、指針式で軸力を考慮できない分、引張り軸力時のせん断強度が過大に評価されている。

4-2. 引張り軸力の増大にともなう最大耐力の低下

R/C柱の引張り軸力の増大に伴い最大耐力が低下することを確認した。最大耐力低下の原因として、引張り軸力によりコンクリートの引張りひずみが増大し有効圧縮強度が低下すること(例えば文献[4])、また、引張り軸力がせん断伝達機構であるトラス機構、アーチ機構の形成に不利な影響を与えることが考えられる。

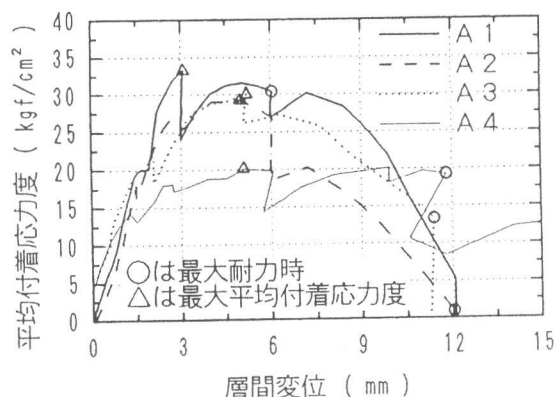


図-7. 平均付着応力度-層間変位関係

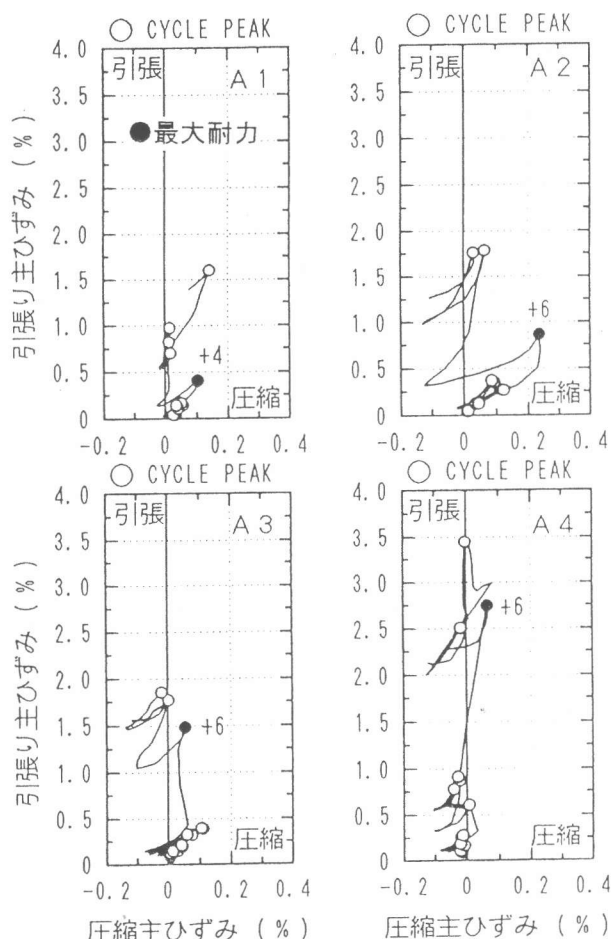


図-8. 圧縮主ひずみ-引張り主ひずみ関係

表-2. せん断強度計算値と実験値

ID	計算値		実験値
	指針式*1	荒川式*2	
A1	29.4(1.10)	25.7(0.96)	26.7
A2	29.4(1.15)	23.7(0.93)	25.5
A3	28.5(1.16)	20.8(0.85)	24.5
A4	21.6(1.14)	18.5(0.97)	19.0

*1: 終局強度指針式 単位: tonf

*2: 修正荒川式(広沢式)

()は実験値に対する比

5. FEM解析

5-1. 解析方法

前項で引張り軸力がトラス機構およびアーチ機構の形成に不利に働くと予想したが、これを検討するため軸力を変数とした試験体A1、A2およびA3に関してFEM解析を行った。解析には、文献〔5〕の2次元非線形有限要素解析プログラムに文献〔6〕のコンクリートの圧縮強度低減係数（引張り主ひずみの関数）を組み込んだものを使用した。

5-2. 試験体のモデル化

図-9に試験体の要素分割図を示す。実験と同様に逆対称曲げせん断加力を行うために、平行クランク機構に相当するフープ要素を設けた。また、解の安定性を増すため加力用のスタブは極力小さくした。加力は実験に従い、柱頭に定軸力を導入後柱頭へ変位増分を与えた。各要素の材料特性は実験結果に従った。表-3に解析モデルの概要を示す。

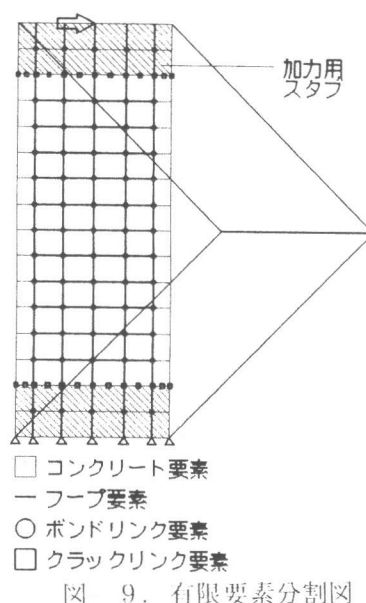


図-9. 有限要素分割図

表-3. 解析モデルの概要

コンクリート	8節点平面応力要素 Darwin等の等価一軸歪に基づく直交異方性モデル 圧縮応力度-歪み関係: Saenzモデル(上昇域) 修正Kent-Park(下降域) 圧縮強度低減係数: 池田-北山式〔5〕
鉄筋	線材要素(バイリニアモデル)
付着	離散型ボンドリンク要素 横補強筋は完全付着とする
ひび割れ	分布型ひび割れモデル 危険断面位置には離散型ひび割れモデル

6. 解析結果

6-1. せん断力-層間変位関係

実験および単調載荷解析によるせん断力-層間変位関係を図-10に示す。全試験体とも最大耐力は実験値とほぼ一致した。引張り軸力0の試験体A1では実験同様横補強筋が降伏した後試験体端部のコンクリートの圧壊をともない最大耐力に到達した。引張り軸力22.5tonfの試験体A2および引張り軸力45tonfの試験体A3では最大耐力時まで横補強筋の降伏は見られなかった。また、引張り軸力0の試験体では中央部の横補強筋の歪みが大きくなるのに対し、引張り軸力を導入した試験体では試験体端部の横補強筋の歪みが大きかった。引張り軸力の増大にともないせん断強度および剛性が低下している点で実験と一致した。

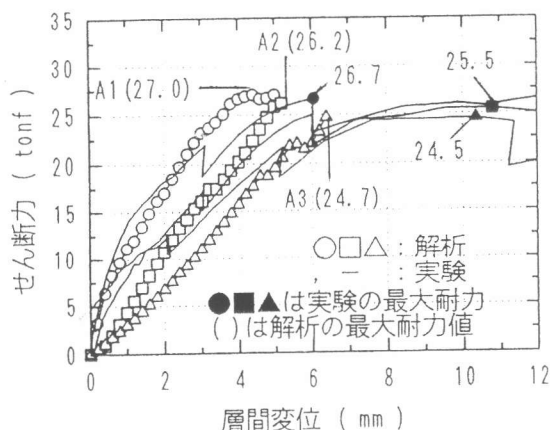


図-10. せん断力-層間変位関係

6-2. 内部応力状態

最大強度時のコンクリートの圧縮主応力度の向きと大きさを図-11に示す。主応力度図から、引張り軸力の増大にともない、試験体中央部での主応力度の角度が緩やかになることがわかる。図-12にコンクリートの主応力度分布を示す。引張り軸力0の試験体A1では主対角線上に圧縮応力度の高い要素が多く見られたが、引張り軸力22.5tonfの試験体A2では、A1と比べ主対角線上の圧縮応力度の高い要素が減少した。引張り軸力45tonfの試験体A3ではその傾向が

さらに顕著になり、圧縮応力度の高い要素は試験体端部に集中した。以上から図-13のように引張り軸力のない場合には主対角方向の圧縮ストラットによってせん断力を伝達するが、引張り軸力の大きい場合には主対角方向に応力を伝達するアーチ機構に対しトラス機構が卓越すると考えられる。

7. まとめ

地震時を想定したRC柱の逆対称曲げせん断実験を引張り軸力およびせん断補強筋量を変数として実施した。また引張り軸力を変数としてFEM解析を行い以下の知見を得た。

- (1) 引張り軸力の増大にともないせん断強度および剛性が低下した。
- (2) 引張り軸力の増大にともない層間変位に占めるせん断変形の割合が小さくなり、曲げ変形成分の割合が大きくなるため変形性能が向上した。
- (3) 引張り軸力が増大しても柱主筋の付着強度はほとんど変わらなかった。
- (4) 終局強度指針式は、引張り軸力時のせん断強度を過大に評価した。
- (5) 引張り軸力の増大と共にせん断伝達機構が変化しアーチ機構が形成されにくくなった。

【謝辞】

本研究は文部省科学研究費（一般研究(B)、代表者：西川孝夫）によって行った。実験に協力いただいた大成建設 伊藤一男氏、FEM解析プログラムを使用させていただいた千葉大学工学部建築学科 野口博 教授に感謝します。

【参考文献】

- [1] 荒川卓ほか：2軸曲げせん断力を受ける鉄筋コンクリート短柱のせん断抵抗性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11-3、pp. 471-476、1989。
- [2] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990. 11
- [3] 広沢雅也ほか：軸力を受ける鉄筋コンクリート部材の強度と粘り、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 817-818、1971. 11。
- [4] Vecchio, F. J. and M. P. Collins: The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, March-April, 1986, pp. 219-231.
- [5] 内田和弘ほか：混合構造接合部の有限要素解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14-3、pp. 15-20、1992。
- [6] 池田浩一郎ほか：拘束筋を有するひびわれコンクリートの圧縮性能劣化に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17-2、pp. 1299-1304、1995。

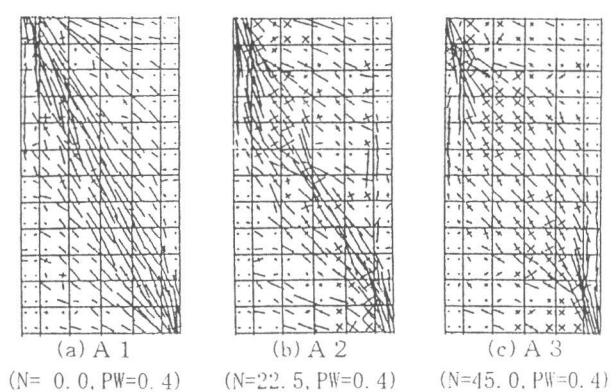


図-11. 圧縮主応力度図

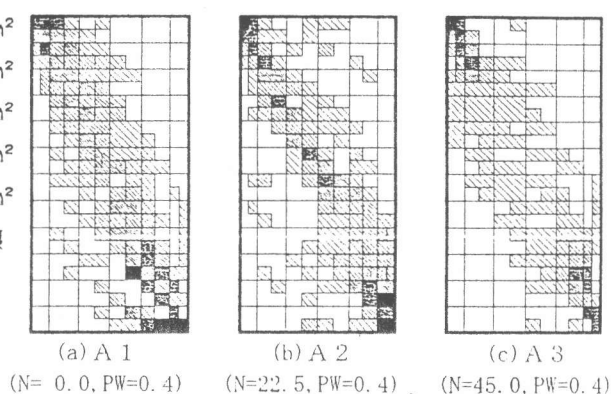


図-12. 圧縮主応力度分布

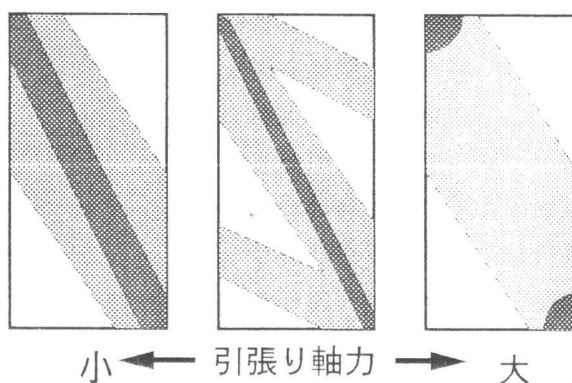


図-13. せん断伝達機構の変化